VLIV VELIKOSTI TĚLESA A METODY ZATĚŽOVÁNÍ NA OHYBOVÉ VLASTNOSTI DUKTILNÍHO UHPC

Jan Vesecký, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika. jan.vesecky@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Odezva v ohybu je jednou z hlavních charakteristik cementových kompozitů, a to zvlášť u duktilních materiálů jako je ultra-vysokohodnotný beton (UHPC) s rozptýlenou výztuží z ocelových mikrovláken. Dosažené výsledky mohou být nicméně značně ovlivněny velikostí zkušebních těles i zvoleným uspořádáním zatěžovací zkoušky. Tento článek proto popisuje výsledky laboratorních zkoušek trámců z UHPC nejčastěji používaných průřezů 40×40 mm, 100×100 mm a 150×150 mm, zatížených tříbodovým a čtyřbodovým ohybem. Dosažené průměrné hodnoty meze vzniku 1. trhliny a maximální ohybové pevnosti potvrzují výrazný vliv velikosti, kdy nejmenší vzorky vykázaly přibližně 1,8÷1,9× vyšší hodnoty v porovnání s největšími vzorky. Menší, avšak nezanedbatelný vliv byl pozorován i z hlediska metody zatěžování - tělesa při tříbodové ohybové zkoušce dosahovala zhruba 1,1÷1,3× vyšších hodnot než při čtyřbodové ohybové zkoušce.

KLÍČOVÁ SLOVA

UHPC • Trámce • Vliv velikosti tělesa • Tříbodový ohyb • Čtyřbodový ohyb

ABSTRACT

The flexural response is one of the main characteristics of cementitious composites, especially for ductile materials such as ultra-high performance concrete (UHPC) with dispersed steel microfiber reinforcement. However, the results obtained can be considerably influenced by the size of the specimens and by the chosen loading arrangement. Therefore, this paper describes the results of laboratory tests of UHPC prisms with the most commonly used cross-sections 40×40 mm, 100×100 mm, and 150×150 mm, loaded in three-point and four-point bending. The average values of the first crack limit and the maximum flexural strength obtained confirm the significant size effect, with the smallest specimens exhibiting approximately 1.8÷1.9 times higher values compared to the largest specimens. A smaller, but not negligible effect was also observed in terms of the loading method - the specimens achieved roughly 1.1÷1.3 times higher values in the three-point bending test than in the four-point bending test.

KEYWORDS

UHPC • Prisms • Size effect • Three-point bending • Four-point bending

1. ÚVOD

Pevnost v tahu za ohybu (zjednodušeně *ohybová pevnost*) patří k základním materiálovým vlastnostem betonu. V případě běžného křehkého betonu se ale její hodnoty pohybují zpravidla v nižších jednotkách megapascalů, které jsou zanedbatelné pro stanovení únosnosti, je-li betonový prvek zároveň vyztužen běžnou betonářskou nebo předpínací výztuží. Ohybová pevnost betonu proto v těchto případech nachází uplatnění pouze při posuzování použitelnosti betonových prvků (z hlediska napětí, trhlin a průhybů).

Duktilní cementové kompozity jako drátkobeton (FRC) a ultra-vysokohodnotný beton (UHPC) dosahují obvykle nejenom vyšších hodnot ohybové pevnosti při vzniku trhliny, ale zachovávají si i tzv. reziduální pevnost, vzhledem ke schopnosti ocelových drátků přemostit rozevírající se trhlinu. V důsledku toho může být ohybová pevnost (resp. pracovní diagram materiálu v ohybu) zohledněna při posuzování únosnosti. Obzvláště to platí v případě UHPC, u kterého je často maximální reziduální ohybová pevnost vyšší než pevnost v okamžiku vzniku trhliny.

Samotné experimentální stanovení ohybové pevnosti je v principu jednoduché, ale výsledky se mohou velmi výrazně lišit v závislosti na zvolené geometrii zkušebního tělesa (tzv. *size effect*) a na způsobu (metodě) zatěžování, viz níže. V praxi jsou pak někdy tyto zásadní zkušební parametry při popisu mechanických vlastností konkrétního cementového kompozitu opomenuty, čímž může dojít ke zkreslení v řádu desítek procent, pokud jsou porovnávány s vlastnostmi jiného cementového kompozitu zkoušeného za rozdílných podmínek. Z toho důvodu je důležité stanovit tzv. převodní koeficienty, které umožňují převádět a porovnávat hodnoty dosažené při různých konfiguracích materiálových zkoušek.

1.1. Vliv velikosti tělesa (size effect)

Mechanické vlastnosti většiny materiálů se zlepšují s klesající velikostí těles, na kterých jsou zkoušeny (Bažant 2000). Tento jev je v první řadě způsoben klesající pravděpodobností, že se u malého tělesa objeví výrazná lokální vada materiálu, ze které

^{*} Školitel: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.

bude iniciováno poškození při zatížení a označuje se proto jako tzv. *statistický size effect* (Bažant a Xi 1991).

U kvazikřehkých heterogenních materiálů jako je beton se navíc musí nejprve poškodit mikrotrhlinami určitá oblast, před vznikem viditelné makrotrhliny. Velikost této oblasti, označované zpravidla jako *nelineární procesní zóna* (Bažant a Kazemi 1990), je de facto materiálovou konstantou, nezávislou na celkové velikosti tělesa. A vzhledem k rozdílu mezi vztahy pro energii spotřebovanou k šíření trhliny a energii uvolněnou nakonec opět menší tělesa vykazují vyšší hodnoty mechanických vlastností – odtud název *energetický* (nebo *deterministický*) *size effect* (Karihaloo, Abdalla a Xiao 2005).

Tyto několik desetiletí známé jevy do určité míry zohledňují i současné normové postupy. Například dle EN 1992-1-1 se může předpokládat lineární nárůst ohybové pevnosti betonu, pokud je výška prvku nižší než 600 mm, a to až na 1,6násobek pevnosti v prostém tahu, při teoreticky nulové výšce prvku, viz rovnice (1) a grafické znázornění na Obrázku 1.

$$f_{ctm,fl} = \left(1, 6 - \frac{h}{1000}\right) \cdot f_{ctm} \ge f_{ctm} \tag{1}$$

kde $f_{ctm,fl}$ je ohybová pevnost betonu, f_{ctm} pevnost betonu v prostém tahu a *h* výška prvku (resp. výška průřezu).



Obrázek 1: Poměr ohybové a tahové pevnosti betonu v závislosti na výšce prvku dle EN 1992-1-1.

1.2. Vliv metody zatěžování

Za *metodu zatěžování* je v rámci tohoto článku považován způsob vnesení zatížení a podepření zkušebních prvků. Z hlediska materiálových zkoušek jde o dva nejtypičtější případy:

- Tříbodový ohyb (1 zatěžovací bod a 2 podpory)
- Čtyřbodový ohyb (2 zatěžovací body a 2 podpory)

Příčina vlivu metody zatěžování na výsledné mechanické vlastnosti opět souvisí s pravděpodobností materiálové vady v prvku, ale odlišným způsobem než v případě size effectu. U dvou těles stejných rozměrů je pravděpodobnost vady stejná, nicméně pokud je jedno z těles zatěžováno tříbodovým ohybem, je pouze jediné místo vystaveno maximálnímu namáhání. Je velmi nepravděpodobné, že toto místo bude zároveň nejslabším místem z hlediska potenciální materiálové vady.

Naopak v případě čtyřbodového ohybu je maximálnímu namáhání vystavena celá střední třetina rozpětí prvku a pravděpodobnost, že se v této oblasti nachází nejslabší místo materiálu je výrazně vyšší.

Proto je změřená pevnost v tříbodovém ohybu zpravidla vyšší než v čtyřbodovém ohybu. V prvním případě tak lze zjištěnou pevnost považovat za tzv. *zdánlivou*, zatímco v druhém se jedná o *skutečnou* pevnost, kterou lze očekávat i u reálné konstrukce s libovolně rozmístěným ohybovým zatížením (resp. libovolným průběhem ohybového momentu).

Míra vlivu metody zatěžování je pro běžný beton kvantifikována například v EN 12390-5, kde je uvedeno, že mezilaboratorními zkouškami bylo zjištěno, že při tříbodovém ohybu trámců byla v průměru změřena o 13 % vyšší pevnost než při čtyřbodovém ohybu.

2. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

2.1. UHPC

Pro výrobu zkušebních těles byla použita průmyslově vyráběná jemnozrnná suchá směs obchodního označení Valucem (obsahující jemné kamenivo, cement a příměsi), superplastifikační přísada, voda a vysokopevnostní ocelová mikrovlákna Weidacon 14/0,2 mm, pevnosti 3000 MPa, v dávce 120 kg/m³ (tj. objemové vyztužení 1,5 %). Podrobnosti jsou uvedeny v Tabulce 1 a složky vizuálně zobrazeny na Obrázku 2.

Tabulka 1: Procentuální zastoupení složek použitého UHPC.

Složka UHPC	Hmotnostní podíl
Suchá směs Valucem	87,0 %
(cement ve směsi)	(32,7 %)
Voda	6,5 %
Superplastifikátor	1,6 %
Ocelová mikrovlákna	4,9 %
w/c	0,20



Obrázek 2: Složky pro výrobu UHPC.

Před zahájením výroby byly všechny složky ochlazeny na teplotu 0 až 5 °C, jelikož nízká teplota pozitivně ovlivňuje zpracovatelnost čerstvé směsi. Míchání probíhalo v míchačce s vertikální osou a nuceným oběhem. Nejprve byla do suché směsi přidána ocelová mikrovlákna, následně polovina dávky vody a superplastifikátoru. Po 5 minutách míchání byla přidána zbývající polovina vody a superplastifikátoru a míchání ukončeno po dalších 5 minutách. Objem záměsí byl přibližně 30 l. Před plněním forem byla provedena zkouška konzistence pomocí Hagermanova kuželu dle EN 1015-3, ale bez setřesení (tedy jednalo se o přirozené rozlití čerstvé směsi), viz Obrázek 3.



Obrázek 3: Zkouška konzistence UHPC.

2.2. Zkušební tělesa

Tělesa pro ohybové zkoušky se (při pominutí různé velikosti) zpravidla dělí na dva základní typy – trámce bez vrubu a trámce s vrubem. Jelikož legislativa pro UHPC, tento relativně nový (ačkoliv od 90. let 20. století vyvíjený) materiál, není dosud mezinárodně ustálená, vznikají zatím pouze přílohy k normám a příručky na úrovni jednotlivých států (např. JSCE 2008, AFNOR 2016). Zkušební postupy pro zjištění ohybových (resp. tahových) vlastností UHPC proto nejsou jednotné a prakticky každá z národních příloh a příruček doporučuje jiný postup, založený buď na existujících zkouškách pro běžné betony a drátkobetony, nebo navrhuje nové postupy s atypickými rozměry těles (např. SIA 2016).

V českém prostředí jsou momentálně za hlavní směrnici o UHPC považována Technická pravidla ČBS 07, resp. jejich mírně rozšířená verze – Technické podmínky 267 Ministerstva dopravy ČR. Oba tyto dokumenty doporučují jako výchozí zkušební postup normu EN 14651+A1 – tříbodový ohyb trámce průřezu 150×150 mm s vrubem 25 mm. Zároveň jsou (jako alternativy) uvedeny postupy dle EN 12390-5 – tříbodový ohyb trámce průřezu 100×100 mm bez vrubu nebo dle EN 196-1 – tříbodový ohyb trámečku průřezu 40×40 mm bez vrubu.

Trámce s vrubem umožňují spolehlivě měřit šířku trhliny v průběhu celého zatěžovacího procesu, což je důležitý údaj především pro následné modelování materiálu. U trámců bez vrubu je takové měření téměř nemožné, s výjimkou využití náročných metod jako korelace digitálního obrazu (DIC; viz např. Niu, Wei a Jiao 2021), jelikož není dopředu známá přesná poloha dominantní makrotrhliny. Na druhou stranu tělesa s vrubem opět do zkoušky zavádí zkreslení z důvodu definování místa, kde má dojít k porušení, aniž by bylo jisté, zda se jedná o skutečně nejslabší místo trámce. Navíc v místě vrubu dochází k výrazné koncentraci napětí (Savruk a Kazberuk 2017), čímž je výsledek dále zkreslen a zjištěné hodnoty pevnosti se mohou výrazně lišit od reálných konstrukcí, u kterých jsou vruby naopak nežádoucí.

Ze všech výše uvedených důvodů bylo proto rozhodnuto zaměřit výzkum pouze na trámce bez vrubu. Byla zvolena geo-

metrie splňující normy EN 12390-1, resp. EN 1015-11, a zároveň odpovídající rozměrům nejrozšířenějších typů forem ve většině laboratoří – tedy 40×40×160 mm, 100×100×400 mm a 150×150×700 mm. Pro každý typ zkoušky byly vyrobeny vždy nejméně 3 vzorky, a to nejméně ze 3 záměsí tak, aby byl potlačen vliv nejistot z výroby. Celkový rozsah experimentálního programu je shrnut v Tabulce 2.

Tabulka 2: Experimentální program – vyrobená tělesa pro ohybové zkoušky.

Geometrie trámců	Počet těles	Počet záměsí	Zkoušky
40×40×160 mm	9	9	3B ohyb
100×100×400 mm	6	3	3B a 4B ohyb
150×150×500 mm	6	3	3B a 4B ohyb
Celkem	21	_	

Formy byly plněny ze středu a vzhledem k vysoké tekutosti se UHPC volně rozlilo do stran bez nutnosti mechanického usměrnění. Nebylo prováděno ani hutnění vibrováním, jen lehký poklep forem a uhlazení horního volného povrchu čerstvé směsi.

Přibližně po 24 hodinách byla tělesa odbedněna, označena a uložena do vody o teplotě zhruba 20 °C, viz Obrázek 4.



Obrázek 4: Shora: formy naplněné čerstvým UHPC; tělesa po odbednění; ošetřování těles ve vodě.

2.3. Materiálové zkoušky

Pro čerstvé UHPC byla provedena výše popsaná zkouška konzistence – rozlití Hagermanova kužele. Následně, v rámci zkoušek ztvrdlého UHPC, byly nejprve provedeny orientační zkoušky modulu pružnosti (dle EN 12390-13) a pevnosti v tlaku (dle EN 12390-3), na doplňkových tělesech (válcích 100×200 mm), vyrobených spolu s výše uvedenými trámci. Všechna tělesa byla navíc před zkouškami měřena a vážena pro stanovení objemové hmotnosti dle EN 12390-7.

Hlavní část výzkumu byla zaměřena na ohybové zkoušky trámců popsaných v předchozí části. Uspořádání zkoušek odpovídalo požadavkům dle norem EN 1015-11 a EN 12390-5, viz Obrázek 5.



Obrázek 5: Schéma uspořádání ohybových zkoušek.

Zkoušky byly řízeny předepsanou rychlostí posunu (průhybu), ve všech případech byla zvolena taková rychlost, aby odpovídající nárůst síly (resp. napětí) byl stejný nebo nižší, než je požadováno právě v EN 1015-11 a EN 12390-5. Po celou dobu byla zaznamenávána síla na lisu a průhyb těles uprostřed rozpětí pomocí jednoho nebo dvou snímačů dráhy, v závislosti na konkrétním uspořádání zkoušky, viz Obrázek 6.



Obrázek 6: *Ohybové zkoušky. Shora:* 40×40×160 mm – 3B ohyb; 100×100×400 mm – 3B ohyb; 100×100×400 mm – 4B ohyb; 150×150×500 mm – 4B ohyb.



Obrázek 6 (dokončení): *Ohybové zkoušky*. 150×150×500 mm – 4B ohyb.

3. VÝSLEDKY

3.1. Doplňkové zkoušky

Doplňkové zkoušky byly provedeny primárně za účelem kontroly kvality UHPC. Jejich výsledky jsou informativně shrnuty v Tabulce 3.

Tabulka 3: Výsledky doplňkových zkoušek (informativně).

Vlastnost	Typ tělesa	Počet těles	Průměrná hodnota	CoV (%)
Rozlití	Hagermanův kužel	12	248 mm	5,0
Modul pružnosti	Wálas	8	60,5 GPa	2,0
Pevnost v tlaku	valec	4	171,2 MPa	5,7
Objem. hmotnost	100×200 IIIII	8	2461 kg/m ³	0,9

3.2. Ohybové zkoušky – diagramy

Ačkoliv je v rámci tohoto příspěvku věnována hlavní pozornost především samotným hodnotám pevnosti a jejich porovnání, tak nelze opomenout, že v případě duktilních cementových kompozitů, jako je UHPC s ocelovými mikrovlákny, je důležitým výstupem materiálových zkoušek též pracovní diagram, tzn. závislost vývoje síly (nebo jiné statické veličiny) na deformaci tělesa.

Jelikož byly testovány trámce tří různých rozměrů, je výhodné záznam zatížení převést na hodnotu maximálního nominální normálového napětí $\sigma_{nom,max}$ (u krajních tažených vláken průřezu), tedy veličinu nezávislou na typu uspořádání zkoušky. K přepočtu lze využít elementární vztah teorie pružnosti:

$$\sigma_{nom,max} = \frac{M_{max}}{W_{el,0}} = \frac{0.5 \cdot F \cdot L_F}{\frac{1}{6} b_0 \cdot h_0^2}$$
(2)

kde M_{max} je maximální ohybový moment, $W_{el,0}$ elastický modul nedeformovaného a nepoškozeného průřezu trámce, F celková síla na lisu, L_F horizontální osová vzdálenost podpůrného a nejbližšího zatěžovacího válce, b_0 a h_0 šířka a výška nedeformovaného a nepoškozeného průřezu trámce. Je třeba poznamenat, že nominální napětí je vztaženo ke stavu tělesa před začátkem zatěžování. Po vzniku 1. trhliny se jedná do jisté míry o fiktivní veličinu, která nahrazuje skutečnou napjatost v rovině průřezu, která je obecně prakticky nezjistitelná. Výsledné průběhy napětí-průhyb jsou zobrazeny na Obrázku 7. Na první pohled je patrné, že nejvyšších hodnot napětí (resp. pevnosti) dosahují malé trámečky 40×40×160 mm vystavené tříbodovému ohybu, a naopak nejmenších hodnot dosahují velké trámce 150×150×500 mm vystavené čtyřbodovému ohybu. U malých trámečků je navíc z diagramů patrný výraznější rozptyl výsledků, který u ostatních těles pozorován není.



Obrázek 7: Diagramy vývoje napětí v závislosti na průhybu trámců v tříbodovém a čtyřbodovém ohybu.

3.3. Ohybové zkoušky – mez vzniku trhliny a pevnost

Z jednotlivých pracovních diagramů byly vyhodnoceny dvě hlavní veličiny – mez vzniku 1. trhliny ($f_{ct,crack,f}$) a maximální pevnost v ohybu ($f_{ct,max,f}$). Zatímco maximální pevnost byla jednoduše odečtena jako nejvyšší bod diagramu, mez vzniku 1. trhliny nebylo vždy možné přesně stanovit ihned během zkoušení, a proto byla dodatečně hledána jako bod na rostoucí části pracovního diagramu, ve kterém došlo k prvnímu skokovému poklesu síly/napětí doprovázenému viditelným poklesem tuhosti.

Výsledné průměrné hodnoty zmíněných veličin jsou přehledně znázorněny na Obrázku 8. Je zřejmá klesající tendence obou veličin od tříbodového ohybu malých trámečků po čtyřbodový ohyb největších trámců.



Obrázek 8: Hodnoty průměrné meze vzniku 1. trhliny a průměrné maximální pevnosti v ohybu (včetně variačních koeficientů CoV) pro jednotlivá uspořádání ohybových zkoušek.

4. VYHODNOCENÍ A DISKUZE

4.1. Převodní koeficienty

Z výsledků uvedených v předchozí kapitole lze jednoduše stanovit převodní koeficienty mezi jednotlivými typy ohybových zkoušek, jako poměr průměrných dosažených hodnot meze vzniku 1. trhliny nebo maximálních pevností v ohybu – viz Tabulka 4 a Tabulka 5. Z definice jsou hodnoty v tabulkách v horní trojúhelníkové a spodní trojúhelníkové části inverzní.

Za předpokladu znalosti materiálových vlastností alespoň jednoho typu ohybové zkoušky (f_{known}), lze poté stanovit očekávanou (neznámou) hodnotu pro jiný typ ohybové zkoušky ($f_{unknown}$) pomocí vztahu:

$$f_{unknown} = k_{TAB} \cdot f_{known} \tag{3}$$

kde k_{TAB} je koeficient odečtený z odpovídajícího sloupce a řádku v jedné z těchto dvou tabulek. Jelikož koeficient nabývá maximální hodnoty 2,39 (resp. inverzní hodnoty 0,42), je evidentní, že i pro nejčastěji používané typy zkušebních těles se mohou výsledky lišit více než dvojnásobně.

Tabulka 4: Převodní koeficienty meze vzniku 1. trhliny v ohybu.

(Mez vzniku 1. trhliny v ohybu)		Neznámá hodnota funknown					
		40-3B	100-3B	100-4B	150-3B	150-4B	
námá hod-	nota f _{known}	40-3B	1	0,72	0,55	0,53	0,42
		100-3B	1,38	1	0,76	0,73	0,58
		100-4B	1,81	1,31	1	0,96	0,76
		150-3B	1,89	1,36	1,04	1	0,79
		150-4B	2,39	1,72	1,32	1,27	1

Pozn.: např. 40-3B značí průřez 40×40 mm a tříbodový ohyb.

Tabulka 5: Převodní koeficienty maximální pevnosti v ohybu.

(Maximální pev-		Neznámá hodnota funknown					
nost v ohybu)		40-3B	100-3B	100-4B	150-3B	150-4B	
námá hod-	nota f _{known}	40-3B	1	0,75	0,67	0,56	0,50
		100-3B	1,33	1	0,89	0,75	0,67
		100-4B	1,49	1,12	1	0,83	0,74
		150-3B	1,78	1,34	1,20	1	0,89
		150-4B	2,00	1,50	1,35	1,12	1

Pozn.: např. 40-3B značí průřez 40×40 mm a tříbodový ohyb.

4.2. Vliv velikosti tělesa (size effect)

Vliv velikosti tělesa je možné z dosažených výsledků nejlépe vyhodnotit, pokud jsou data z Obrázku 8 vykreslena v grafu, který ve skutečném měřítku zohledňuje velikost (výšku) průřezu, metodu zatěžování a typ zkoumané veličiny. V tomto zobrazení (viz Obrázek 9) je poté zřetelné, že mez vzniku 1. trhliny i maximální pevnost v ohybu téměř dokonale lineárně klesají s rostoucí výškou průřezu.

Z dostupných dat je možné tento trend bezpečně pozorovat pouze u tříbodového ohybu, nicméně i data ze čtyřbodového

ohybu vizuálně poměrně dobře kopírují stejný trend v intervalu výšky průřezu 100 až 150 mm.



Obrázek 9: Vyhodnocení size effectu (procentuální hodnoty jsou vztaženy k referenčním hodnotám pro výšku 150 mm).

4.3. Vliv metody zatěžování

Posledním důležitým poznatkem, který lze odvodit z laboratorních dat, je vliv metody zatěžování, tedy poměr mezi materiálovými vlastnostmi z tříbodového a čtyřbodového ohybu. Výsledky jsou pro tělesa stejné velikosti shrnuty v Tabulce 6.

Tabulka 6: Vyhodnocení vlivu metody zatěžování.

Materiálová vlastnost	Porovnávané zkoušky	Nárůst
Mez vzniku 1. trhliny	100-3B/100-4B	+31 %
v ohybu	150-3B/150-4B	+27 %
Maximální pevnost	100-3B/100-4B	+12 %
v ohybu	150-3B/150-4B	+12 %

Pozn.: např. 100-3B značí průřez 100×100 mm a tříbod. ohyb.

4.4. Diskuze

Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že pro UHPC s ocelovými mikrovlákny je vliv velikosti tělesa i metody zatěžování výrazný, v řádu vyšších desítek procent, při větším rozdílu ve velikosti těles dokonce i více než 100 %. Uplatňují se stejné zákonitosti, které jsou známé pro běžný beton, tedy že s rostoucí výškou průřezu klesají hodnoty ohybových materiálových vlastností a při čtyřbodovém ohybu je vždy dosaženo nižších hodnot než v případě tříbodového ohybu.

Vliv velikosti tělesa (size effect) je prakticky lineárně závislý na výšce průřezu, což velmi dobře koresponduje s předpoklady pro běžný beton (pro srovnání viz Obrázek 1 a Obrázek 9). Ze změřených dat nicméně nelze stanovit minimální (asymptotické) hodnoty ohybových vlastností UHPC, jelikož nebyly zkoumány prvky s průřezy velikosti větší než 150 mm ani stanovena pevnost v prostém tahu.

Poměr mezi výsledkem tříbodové a čtyřbodové ohybové zkoušky se pro mez vzniku 1. trhliny pohybuje okolo hodnoty

1,30, což je více než pro běžný beton. Z hlediska maximální ohybové pevnosti je pak tento poměr 1,12 a v tomto případě se tedy výsledek velmi dobře shoduje s hodnotou udávanou pro běžný beton – 1,13 (viz předmluva k EN 12390-5).

5. ZÁVĚR

V článku byly popsány a vyhodnoceny výsledky laboratorních zkoušek duktilního UHPC s ocelovými mikrovlákny, vyrobeného z průmyslově dodávané suché směsi, dosahujícího průměrné tlakové pevnosti přibližně 170 MPa.

Hlavní část výzkumu byla zaměřena na ohybové zkoušky různého uspořádání (tříbodový a čtyřbodový ohyb) a velikosti zkoušených těles (průřezy výšky 40 mm až 150 mm). Ačkoliv je třeba výsledky vnímat v kontextu relativně nízkého počtu zkušebních těles (zpravidla 3 pro každé zkoušené uspořádání), lze dosažené poznatky považovat za poměrně spolehlivé, vzhledem k malému rozptylu dílčích měření.

Ze získaných dat je zřejmé, že s rostoucí velikostí zkušebních těles klesají mechanické vlastnosti v ohybu a rovněž klesají při čtyřbodovém ohybu v porovnání s tříbodovým ohybem, tedy podobně jako je tomu v případě běžného betonu. Vliv velikosti (size effect) vykazuje prakticky negativně lineární závislost na výšce průřezu. Nárůst mechanických vlastností při tříbodovém ohybu je oproti čtyřbodovému ohybu v rozmezí 10 až 30 %.

Z dosažených výsledků byly odvozeny převodní koeficienty mezi jednotlivými zkoumanými typy ohybových zkoušek, přičemž dosahují hodnoty až téměř 2,4 (pro mez vzniku 1. trhliny), resp. 2,0 (pro maximální pevnost).

Z hlediska praktického návrhu prvků z UHPC lze na základě dosažených poznatků jednoznačně doporučit, aby byly ohybové materiálové zkoušky prováděny na tělesech co největší dostupné velikosti, a to za čtyřbodového ohybu. Tímto uspořádáním lze získat realistické (a konzervativní) hodnoty mechanických vlastností. Zkoušky na menších tělesech jsou vhodné jen v situaci, kdy jsou dopředu známé rozměry navrhovaného/posuzovaného prvku a ty se blíží právě rozměrům těchto těles.

5.1. Další výzkum

Vzhledem k známým omezením výsledků popsaným výše je nepochybně vhodné problematiku vlivu velikosti těles a způsobu zatěžování na mechanické vlastnosti UHPC zkoumat dále. V návaznosti na prezentovaný výzkum se nabízí především následující témata:

- Ověření přesnosti dosažených výsledků s využitím rozsáhlejšího experimentálního programu (snížení nejistot souvisejících s nízkým počtem těles)
- Nalezení minimální (asymptotické) ohybové pevnosti pro trámce velkého průřezu, příp. vztahu mezi pevností v ohybu a v prostém tahu (ve smyslu grafu na Obrázku 1).
- Zopakování obdobného výzkumu pro UHPC jiného složení a/nebo vyztužení. Ověření, zda lze zjištěné převodní koeficienty považovat za univerzální nebo jsou unikátní pro každý typ UHPC.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování za asistenci v průběhu celého výzkumného projektu patří Ing. Janu Kubátovi a zaměstnancům laboratoří Katedry betonových a zděných konstrukcí a Experimentálního centra.

Tento článek byl podpořen granty Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS23/039/OHK1/1T/11 (Analýza štíhlých prvků z cementových kompozitů a oblastí s vysokou koncentrací napětí) a SGS24/040/OHK1/1T/11 (Moderní cementové kompozity a jejich efektivní použití v konstrukcích).

Literatura

- AFNOR NF P 18-710 (2016), National addition to Eurocode 2 – Design of concrete structures: specific rules for UHPFRC. France.
- Bažant, Z. P. & Kazemi, M. T. (1990), Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete. *Int. J. of Fracture.* 44, 111-131.
- Bažant, Z. P. & Xi, Y. (1991), Statistical Size Effect in Quasi-Brittle Structures: II. Nonlocal Theory. J. of Engineering Mechanics. 117(11), 2623-2640.
- Bažant, Z. P. (2000), Size effect. Int. J. of Solids and Structures. 37, 69-80.
- EN 1015-3 (1999), Methods of test for mortar for masonry Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). CEN
- EN 1015-11 (2019), Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. CEN
- EN 12390-1 (2021), Testing hardened concrete Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds. CEN
- EN 12390-2 (2019), Testing hardened concrete Part 2: Making and curing specimens for strength tests. CEN
- EN 12390-3 (2019), Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens. CEN
- EN 12390-5 (2019), Testing hardened concrete Part 5: Flexural strength of test specimens. CEN
- EN 12390-7 (2019), Testing hardened concrete Part 7: Density of hardened concrete. CEN
- EN 12390-13 (2021), Testing hardened concrete Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression. CEN
- EN 14651+A1 (2007), Test method for metallic fibre concrete Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). CEN

EN 196-1 (2016), *Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*. CEN

- EN 1992-1-1 (2004), Eurocode 2: Design of concrete strucutres – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN
- JSCE (2008), Recommendations for Design and Construction of HPFRCC. Japan.
- Karihaloo, B. L., Abdalla, H. M., Xiao, Q. Z. (2005), Deterministic size effect in the strength of cracked concrete structures. *Cement and Concrete Research*. 36(1), 171-188.

- Niu, Y., Wei, J., Jiao, Ch. (2021), Crack propagation behavior of ultra-high-performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid steel fibers under flexural loading. *Construction and Building Materials*. 294, 123510.
- Savruk, M. P., Kazberuk, A. (2017) Stress Concentration at Notches. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-4455-7. DOI 10.1007/978-3-319-44555-7
- SIA (2016). Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) Baustoffe, Bemessung und Ausführung. Switzerland.

TP ČBS 07 (2022), Ultra vysokohodnotný beton (UHPC).

Technické podmínky TP 267 (2024), *Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)*. Ministerstvo dopravy ČR & Ředitelství silnic a dálnic s. p.